

Таблица 4
Плотность минеральных сростков

Тип сростков	Плотность, г/см ³
Свободные рудные зерна	4,64
Богатые сростки	4,24
Рядовые сростки	3,63
Бедные сростки	3,25
Свободные нерудные сростки	2,45

Таблица 5
Значения удельной магнитной восприимчивости разных типов минеральных сростков

Тип сростков	$\chi \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$
Свободные рудные зерна	444
Богатые сростки	450
Рядовые сростки	631
Бедные сростки	558
Свободные нерудные сростки	315

строением с равномерным распределением рудного минерала, что подчеркивает низкую степень ее контрастности и обуславливает неэффективность применения методов кускового предобогащения.

Хромит является единственным рудным минералом с постоянным химическим составом: Cr_2O_3 — 58–61 %, Al_2O_3 — 8–11 %, MgO — 11–13 % и $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ — 14–17 %. Участками фиксируются небольшие проявления более железистой ($\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ — 24–26 %) разновидности хромита. Средний размер зерен хромита составляет 0,6–0,9 мм. Наличие грубой трещиноватости, разделяющей минеральные зерна на угловатые фрагменты со средним размером 0,4–0,6 мм, снижает класс крупности раскрытия рудных зерен до 1,0 мм.

В классах крупности $-0,5+0,2$ мм, $-0,2+0,1$ мм, $-0,1+0,071$ мм и $-0,071+0,044$ мм количество минеральных сростков не превышает 11 %, а количество свободных рудных зерен увеличивается до 38 %, что позволяет процесс раскрытия минералов в данных классах крупности отнести к весьма эффективному ($\eta=75\%$).

Оценка плотности и удельной магнитной восприимчивости для разных типов сростков, полученных экспериментальным путем, позволила рекомендовать в качестве основного метода обогащения руд гравитационный. Таким образом, настоящее исследование показывает возможность предварительной оценки вкрапленных хромовых руд методами технологической минералогии.

Авторы выражают благодарность Ожогойной Е.Г. за ценные советы и плодотворное обсуждение результатов исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 5180–84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М., 1985.
- Кузьмин, В.И. Комплексование минералогических методов исследования при лабораторных испытаниях технологических проб / В.И. Кузьмин / Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья: Сб. научных трудов. — М.: ВИМС, 1997. — С. 125–132.

- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Хромовые руды. Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р.
- Павлов, Н.В. Хромиты Кемпирсайского плутона / Н. В. Павлов, Г.Г. Кравченко, И.И. Чупрынина. — М.: Наука, 1968. — 178 с.
- Пирогов, Б.И. Системное минералого-технологическое исследование руд в связи с их обогащением / Б.И. Пирогов // Разведка и охрана недр. — 2019. — № 2. — С. 41–50.
- Проект на выполнение работ по объекту: Проведение разведочных работ на хромовые руды в границах Аккаргинского участка. Кн. 1. — Красноярск, 2018. — 105 с.
- Реестр хромитопоявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала. — Пермь: КамНИИКИГС, 2000. — 474 с.
- Савельев, Д.Е. Хромиты Аккаргинского массива (Южный Урал) / Д.Е. Савельев, И.И. Мусабинов // Вестник Пермского университета. Геология. — 2018. — Т. 17. — № 1. — С. 61–74.
- Технологическая оценка минерального сырья. Опробование месторождений. Характеристика сырья: Справочник / Под ред. П.Е. Остапенко. — М.: Недра, 1990. — 272 с.

© Коллектив авторов, 2019

Горбатова Елена Александровна // lena_gorbatova@mail.ru
 Пирогов Борис Иванович // pirogov_bi@inbox.ru
 Раков Леонид Тихонович // rakovlt@mail.ru
 Киселев Александр Александрович // a.kiselev11@mail.ru
 Иоспа Анастасия Владимировна // ada_heals@mail.ru
 Чепрасов Игорь Владимирович // i.v.cheprasov@yandex.ru

УДК 622.24

Борисов К.А., Третьяк А.А., Сидорова Е.В. (Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова)

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА БУРОВЫХ ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ PDC

*Дано описание решений, позволяющих добиться уменьшения износа и поломок породоразрушающего инструмента (ПРИ), армированного PDC (polycrystalline diamond cutter) за счет подбора смазки в растворе, воздействия физическими полями (постоянные магниты), антивибрационной конструкции долот, оптимизации технологических параметров бурения скважин (Pк Н, N об/мин, Q л/мин). **Ключевые слова:** прочностные свойства долот PDC, вибрации долота, буровой раствор, крутильная вибрация, осевая вибрация, поперечная вибрация.*

Borisov K.A., Tretyak A.A., Sidorova E.V. (Platov South-Russian State Politechnical University (NPI))

IMPACT OF VIBRATIONS ON STRENGTH PROPERTIES OF DRILL BITS REINFORCED BY PDC

*The description of solutions to reduce wear and breakage of rock cutting tool, the reinforced polycrystalline diamond cutter due to selection of lubricant in solution, the impact of physical fields (permanent magnets), anti-vibration design bits, optimization of technological parameters of drilling (P, N), N, (rpm), Q, (lpm)). **Keywords:** strength properties of PDC bits, bit vibrations, drilling mud, torsional vibration, axial vibration, transverse vibration.*

Вибрации долота являются основной причиной повышенного износа и поломок резцов PDC. На долото воздействуют различные типы вибраций в зависимости

от целого ряда факторов. Применение прогрессивных скоростных режимов бурения возможно лишь при использовании методов и средств борьбы с вибрациями.

Используя опыт эксплуатации буровых долот, армированных PDC, было установлено, что снижение уровня вибрации способствует уменьшению износа, увеличению механической скорости бурения и работки на долото. В соответствии с этим нами были разработаны и внедрены в практику буровых работ технические и технологические мероприятия, способствующие уменьшению вибрации буровых долот.

Причины вибраций можно разделить на три группы [1, 3]. К первой относятся геологические причины. Вибрация возникает при бурении перемежающихся твердых и мягких горных пород (например, тонкослоистых роговиков, джеспилитов, кварцитов, а также пород, имеющих неравномерную зернистость и неоднородную структуру), разрушенных и трещиноватых, осадочных и слоистых, полосчатых и гнейсовидных, слоистость или сланцеватость которых образует острый угол с осью скважины. Особенно сильные вибрации возникают при проходке скважин в обрушающихся или кавернозных породах, а также в породах, образующих «желоба», где бурильная колонна может иметь сильный изгиб.

Вторая группа — технические причины. Среди них можно выделить четыре вида [2, 4, 6]:

1. Применение искривленных бурильных и колонковых труб; отсутствие соосности в колонне из-за неправильного изготовления резьбовых соединений и корпусов ниппелей, муфт и замков; неравномерный односторонний износ труб и соединений.

2. Большие зазоры между бурильными трубами и стенками скважины, недостаточная жесткость бурильной колонны; ступенчатые конструкции скважин; повышенная разработка отдельных интервалов ствола и отклонение формы сечения скважины от кольцевого, отсутствие утяжеленных бурильных труб в компоновке бурового снаряда.

3. Неправильный монтаж и неудовлетворительное состояние бурового оборудования: недостаточная массивность и жесткость фундамента станка; установка станка на наклонной площадке и нежесткое крепление станины к салазкам; недостаточная мощность привода станка, которая приводит к его неравномерной работе; износ втулок или искривление направляющих штоков гидроцилиндров; износ зубчатых передач; несоблюдение соосности шпинделя и оси скважины; эксцентричное закрепление ведущей бурильной трубы в шпинделе станка; применение несбалансированных промывочных сальников; неравномерная подача масла маслососом в гидроцилиндры; люфты в зацеплениях зубчатых передач.

4. Применение долот, не соответствующих по типу физико-механическим свойствам и буримости проходимых горных пород, а также долот с односторонним износом торца, с зашлифованными или с большим количеством сколотых, выпавших резцов; проходка перемежающихся по твердости пород без калибрующего расширителя.

Третья группа — технологические причины [5]. К ним относятся следующие:

1. Нарушение рекомендаций по применению параметров режима бурения: превышение осевой нагрузки на долото и скорости вращения инструмента против оптимальных или рациональных для данных условий бурения.

2. Бурение при самозаклинке керна, при значительных искривлениях ствола скважины, при наличии на забое кусков металла или горной породы, бурение по керну, оставленному в скважине.

3. Бурение без применения антивибрационных средств и с буровым раствором без должной смазывающей способности.

Интенсивность колебаний колонны характеризуется амплитудой (величиной наибольшего отклонения колонны от оси скважины) и частотой (количеством колебаний за единицу времени). Величина, обратная частоте, называется периодом колебаний (время между двумя последовательными одинаковыми состояниями системы). При совпадении частоты вынужденных колебаний под действием возмущающих сил с частотой собственных колебаний колонны возникают резонансные явления, амплитуда и частота колебаний возрастают, и появляется вибрация. Скорость вращения колонны, приводящая к резонансу, называется критической. К главным факторам, вызывающим вибрацию бурильной колонны, относятся центробежные усилия, возникающие на несбалансированных участках колонны и в замковых соединениях, частые изменения величины крутящего момента и сжимающих колонну усилий, силы трения колонны о стенки скважины, пульсация промывочной жидкости и т.д. Многообразие причин вибраций заставляет считать, что аналитически нельзя однозначно получить формулу для расчета значений частот колебаний труб. Наиболее достоверные данные о частоте могут быть получены лишь экспериментально — непосредственным измерением в скважине.

Смазки, добавляемые в буровой раствор, являются своеобразным демпфером, поглощающим удары колонны о стенки скважины, в результате чего снижаются поперечные вибрации, и стенки скважины меньше разрушаются. Последние должны обладать способностью прочно прилипать к мокрой поверхности бурильных труб, соединений и стенок скважины; не смываться потоком промывочной жидкости; не образовывать сальники в скважине; достаточной вязкостью, чтобы образовывать упругий слой, способный противостоять ударным нагрузкам и гасить вибрации; высокими смазочными свойствами — максимально снижать потери энергии на трение при вращении колонны в скважине, уменьшать или предупреждать износ бурильных труб; антикоррозионными свойствами по отношению к бурильным и обсадным трубам.

Когда резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами асимметрично внедряются в забой скважины, мгновенный центр вращения перемещается в это место и коронка пытается вращаться вокруг точки, не представляющей геометрический центр.

Это создает обратно-направленное движение или завихрение, поскольку центр вращения движется вокруг ствола против направления вращения долота. В результате этого создается многолепестковая картина забоя скважины вместо концентрического кругового резания долотом, то есть возникают вибрации: осевая (продольная), крутильная и боковая (поперечная).

Повышенная вибрация бурового снаряда приводит к уменьшению проходки на долото, к более интенсивному износу инструмента и оборудования, увеличению количества аварий с бурильными трубами и расходу дополнительной энергии. Все это в конечном итоге снижает производительность и уменьшает эффективность бурения коронками, армированными РДС. Поэтому необходимо всегда своевременно принимать меры для предупреждения и снижения вибрации бурильной колонны.

Рассмотрим в каких случаях образуется масляный клин при работе бурильных труб в скважине. Таких случаев три (рис. 1). Первый случай — при вертикальной вибрации, когда изогнутая колонна труб оказывается прижатой к стенке скважины под некоторым углом φ_1 , величина которого зависит от размеров скважины, труб и длины полуволны бурильной трубы.

Второй и третий случаи имеют место при вращении колонны труб в скважине либо вокруг собственной оси, либо вокруг оси скважины.

Одним из факторов, уменьшающих вибрацию и износ, является правильно подобранная промывочная жидкость. Нами проведены лабораторно-промышленные исследования противоизносных и смазочных свойств различных буровых растворов и добавок к ним. На кафедре «Нефтегазовая техника и технологии» предложен, на уровне изобретения, буровой раствор с высокой смазывающей способностью для бурения горных пород в сложных геологических условиях (патент RU № 2582197).

Всю совокупность технологических свойств буровых растворов можно объединить в пять групп: 1) реологические свойства; 2) плотность; 3) фильтрационные свойства; 4) химическая активность по отношению к разрушаемой породе; 5) противоизносные и смазочные свойства.

Введение в буровой раствор противоизносных и смазочных добавок изменяет его общетехнологические свойства. Регулирование последних также отражается на противоизносных и смазочных свойствах сред. Показателями реологических свойств растворов являются вязкость и предельные статическое и динамическое напряжения сдвига.

С ростом содержания твердой фазы в буровом растворе увеличивается его плотность, как правило, возрастают и показатели реологических свойств. При этом уровень проявления противоизносных и смазочных свойств существенно зависит

от состава и концентрации твердой фазы. При небольших добавках в раствор бетонитовых глин возможны улучшение его противоизносных и смазочных свойств, повышение показателей работ долот.

Влияние реагентов-понижителей водоотдачи на противоизносные и смазочные свойства растворов изучено недостаточно, однако имеющиеся данные свидетельствуют о том, что такие реагенты положительно влияют на эти свойства. По-видимому, улучшение противоизносных и смазочных свойств растворов возможно и при введении других реагентов-понижителей водоотдачи, поскольку все они обладают свойствами поверхностно-активных веществ. Смазочная способность такого раствора проявляется в снижении сил трения породоразрушающего инструмента и бурильных труб о горную породу скважин, а противоизносные свойства — в снижении износа в целом.

Постановленную задачу удалось решить за счет того, что буровой раствор для бурения скважин, включающий полианионную целлюлозу, хлористый калий, барит, бишофит, феррохромлигносульфонат, метилсиликонат калия, ацетат калия, пеногаситель, воду, дополнительно содержит мраморную крошку, отходы растительного масла, ГКЖ-11, сульфанол при следующем соотношении компонентов, масс. %: мраморная крошка — 5–10, полианионная целлюлоза — 2–10, сульфанол — 2–5, хлористый калий — 2–5, метилсиликонат калия — 1–4, ацетат калия — 1,5–4, бишофит — 2–5, феррохромлигносульфонат — 1–5, ГКЖ-11 — 2–5, барит — 0,5–5, пеногаситель — 0,5–1, жидкая фаза — остальное, причем жидкая фаза включает отходы растительного масла и воду в соотношении масс. % 55/45–80/20. Технический результат этого раствора — улучшение крепящих, смазочных и противоприхватных свойств бурового раствора на углеводородной основе при одновременном улучшении коэффициента восстановления первоначальной проницаемости продуктивного пласта, путем повышения

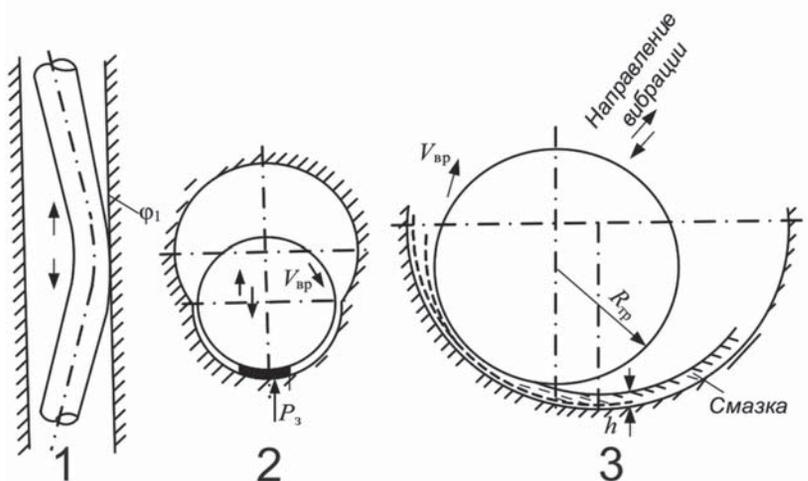


Рис. 1. Образование клинового зазора в слое раствора: 1 — при продольной вибрации труб; 2 — при вращении трубы вокруг собственной оси; 3 — при вращении вокруг оси скважины

Виды разрушения PDC

№ п/п	Вид разрушения	износ, шт	поломка, шт	% от общего числа
1	Износ PDC	28	—	50,0
2	Скол со стороны передней грани PDC	—	13	22,8
3	Скол со стороны задней грани PDC	—	8	14,4
4	Отрыв пластины PDC	—	2	3,6
5	Разрушение PDC от продольных вибраций	—	5	9,2
	ВСЕГО		56	100

ингибирующей и гидрофобизирующей способности фильтрата раствора и, как результат — отсутствие образования желобов и дифференциальных прихватов в стволе скважины, повышение устойчивости ствола наклонно-направленных и вертикальных скважин. Улучшение ингибирующего качества раствора возможно за счет повышения его крепящего действия. В механизме синергетического эффекта подтверждена составляющая доля действия каждого реагента. Достигается это за счет введения реагентов-ингибиторов набухания глин. В качестве растительных масел могут использоваться отходы, получаемые при изготовлении соевого, подсолнечного, хлопкового, кукурузного, рапсового и других масел.

Сульфанол выполняет функцию эмульгатора, который представляет собой синтетическое ПАВ анионного типа в виде порошка, хорошо растворимое в воде, образующее прочную эмульсию. Мраморная крошка является структурообразователем. Полианионная целлюлоза (ПАЦ 85/700) является регулятором фильтрации. В качестве пеногасителя чаще всего используется пента 465. Барит как утяжелитель применяется в количестве от 0,5 до 10 %.

Предлагаемый раствор обладает очень высокими ингибирующими свойствами, нулевой фильтрацией, имеет улучшенные структурно-реологические, антиприхватные и природоохранные свойства для осложненных условий бурения. Экспериментально подтверждено явление синергетического эффекта при комплексной обработке бурового раствора несколькими реагентами-ингибиторами.

При бурении разведочных скважин на площадях Ростовской буровой компании доказано улучшение крепящих свойств раствора за счет синергетического эффекта от действия предлагаемых компонентов.

Экспериментально подтвержден синергетический эффект действия компонентов раствора — комплекс реагентов работает лучше, чем каждый компонент в отдельности. Предлагаемый состав нового раствора обладает высочайшей инги-

бирующей способностью, способствует замедлению процесса гидратации и набухания глинистых отложений. Предложенное сочетание реагентов позволяет раствору успешно предупреждать, приостанавливать и подавлять деформационные процессы в околоствольном пространстве скважины, уменьшает кавернозность.

Показано, что предлагаемый раствор обладает улучшенными смазывающими и антиприхватными свойствами при существенных энергосберегающих показателях и достаточном уровне экологической безопасности всех добавок, при этом уменьшается риск дифференциальных прихватов, улучшается реологический профиль скоростей промывочной жидкости в кольцевом пространстве и повышается стабильность эмульсии. Это способствует эффективному выполнению гидравлической программы промывки скважины. Предложенный буровой раствор на углеводородной основе с высокими ингибирующими, фильтрационными и смазывающими свойствами, имеет параметры: фильтрация раствора — 0 см³/за 30 мин, липкость корки равна 0, коэффициент трения меньше 0,1, толщина корки меньше 0,5 мм, отношение масло/вода в % составляет 80/20, плотность раствора от 1,1 до 1,2 г/см³, условная вязкость по СПВ-5 — 35–40 сек., пластическая вязкость — 20–40 мПа·с, СНС 1/10 мин — 15–20/20–30 дПа, содержание песка меньше 0,5 %, содержание Са⁺⁺ больше 16000 мг/л, содержание К⁺ больше 18000 мг/л.

Экспериментальные работы выполнялись непосредственно в полевых условиях ООО НПП «Ростовская буровая компания», ОАО «Алроса» на скважинах глубиной до 500 м. Выполненными исследованиями надежности PDC установлены виды поломок и структура поломок резцов. Из данных таблицы следует, что наиболее частым видом разрушения режущей части PDC является их износ (50,0 %) и скол со стороны передней грани (22,8 %). Резцы буровой коронки при этом еще не затуплены и некоторое время могут работать.

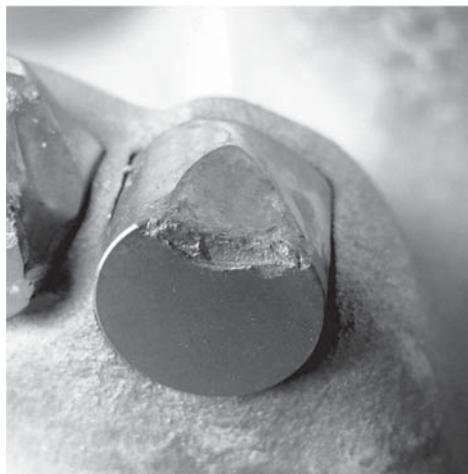


Рис. 2. Поломка PDC



Рис. 3. Износ PDC

Оценивая полученные экспериментальные результаты необходимо отметить, что наибольший процент выхода из строя долот, по причине разрушения PDC, происходит из-за поломки PDC, отрыва пластины PDC, а также сколы по передней и задней грани. Причиной этих аварий является наличие забойной вибрации.

Наработка буровых долот, армированных PDC зависит в основном от износа и поломок режущих элементов. Износостойкость PDC в 50–100 раз превышает износостойкость резцов из вольфрамокобальтовых твердых сплавов. Но на каждой из отработанных долот количество изношенных и поломанных режущих элементов примерно одинаково. Поэтому выяснение причин поломки PDC на буровых долотах задача актуальная. Так, например, предел прочности на сжатие пород V–VI категории по буримости равен $\sigma_{сж}^n = 95 - 98$ МПа, а у твердого сплава ВК-8 $\sigma_{сж}^n = 4500 - 4600$ МПа, т.е. в 45–50 раз выше, чем у породы.

Опыт работы на месторождениях ОАО «Алроса» позволяет утверждать, что вибрации долота зачастую являются основной причиной ускоренного износа резцов PDC. На долото могут действовать различные типы вибраций, но крутильная и осевая (эффект пружины) вибрации встречаются наиболее часто. Эффектом пружины называется замедление вращения долота при контакте с горной породой от трения, ведущее к остановке вращения. При этом энергия вращения продолжает поступать на долото от бурового станка через буровые трубы, пока она не преодолеет силу трения. Тогда колонковый снаряд начинает раскручиваться с ускорением, превышающим в два и более раза номинальную скорость вращения.

Так же, как и при поперечной вибрации это увеличивает ударную нагрузку на PDC, приводящую к их поломке (рис. 2), более интенсивному износу (рис. 3).

Оценивая вышеизложенное, и с учетом опыта отработки буровых долот, армированных PDC, необходи-

мо отметить, что основными причинами вибраций при бурении горных пород VI–VIII категории по буримости являются:

1. Неверно подобранная конструкция низа буровой колонны.
2. Не рационально подобранные технологические параметры (нагрузка, частота вращения, количество и качество промывочной жидкости).
3. Применение бурового раствора без необходимой смазывающей способности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вопияков, В.А.* Возникновение автоколебаний буровой колонны — критерии износа шарошечных долот / В.А. Вопияков, С.А. Пошташ, П.И. Колесников // Бурение. — 1974. — № 3. — С. 23–25.
2. *Третьяк, А.А.* Лабораторные исследования поломок режущих элементов буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами / А.А. Третьяк, Ю.Ф. Литкевич, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Деловой журнал Neftegaz.ru. — 2018. — № 7. — С. 50–54.
3. *Третьяк, А.А.* Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.А. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 8. — С. 225–230.
4. *Третьяк, А.А.* Определение поломок резцов PDC с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования / А.А. Третьяк, А.В. Кузнецова, К.А. Борисов // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2019. — Т. 330. — № 5. — С. 169–177.
5. *Третьяк, А.А.* Биополимерный высокоингибирующий буровой раствор для сооружения наклонно-направленных и горизонтальных скважин / А.А. Третьяк, Ю.М. Рыбальченко, М.Л. Бурда, С.А. Онофриенко // Время колтыбинга. Время ГПП. — 2011. — № 2–3. — С. 66–74.
6. *Soares, C.* Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients (2016) / C. Soares, H. Daigle, K. Gray // Journal of Natural Gas Science and Engineering. — 2016. — 34. — pp. 1225–1236. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.08.012.

© Борисов К.А., Третьяк А.А., Сидорова Е.В., 2019

Борисов Константин Андреевич // 13020165@mail.ru
Третьяк Александр Александрович // 13050465@mail.ru
Сидорова Елена Владимировна // 13050465@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 556.3.02

Аликин Э.А. (Пермский государственный национальный исследовательский университет)

МОНИТОРИНГ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ — ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

В статье изложены основные вехи формирования нормативно-методических документов в сфере охраны недр и их реализации как основы рационального недропользования. Творческое использование системного подхода к изучению воздействия разнообразных техногенных объектов на геологическую среду (ГС) позволили разрабо-

*тать принципы методологии решения прямых и обратных задач управления эксплуатацией разнообразными геолого-техническими комплексами (ГТК), обеспечивающими их безаварийное функционирование в пределах расчетного периода. **Ключевые слова:** охрана недр, рациональное недропользование, геологическая среда.*

Alikin E.A. (Perm State National Research University)
GEOLOGICAL ENVIRONMENT MONITORING —
YESTERDAY, TODAY, TOMORROW

The article describes the main milestones in the formation of regulatory and methodological documents in the field of subsoil protection and their implementation as the basis for ratio-